

徐浦大桥结构健康监测系统设计概述

王祺明

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 主要介绍上海徐浦大桥结构健康监测系统建设的必要性、功能分析、设计背景、设计原则及内容。项目建设目标是建立一个功能强大、技术先进、造价合理的桥梁结构健康监测系统,为桥梁全寿命养护管理提供可靠支撑。该桥结构健康监测系统的设计方案包括测点布置、数据采集与传输、阈值设定及评估系统。测点布置根据结构需求、规范要求等因素确定;对大桥的健康度进行实时评估,根据评估等级启动响应预案;系统的建设实现了对大桥结构状态的实时监测和评估,为大桥的安全运营提供了有力保障。

关键词: 徐浦大桥;健康监测;测点布置;数据采集;健康度评估

中图分类号: U443

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0191-05

Overview of the Structural Health Monitoring System Design for Xupu Bridge

WANG Qiming

[Shanghai Municipal Engineering Design General Institute(Group)Co.,Ltd, Shanghai 200092, China]

Abstract: This article mainly outlines the necessity, functional analysis, design background, principles, and technical content of the structural health monitoring system for Shanghai Xupu Bridge. The project aims to establish a robust, technologically advanced, and cost-effective bridge health monitoring system to provide reliable support for the bridge's lifecycle maintenance management. The system design includes sensor layout, data acquisition and transmission, threshold setting, and an evaluation system. Sensor placement is determined based on structural requirements, regulatory standards, and other critical factors. The system conducts real-time assessments of the bridge's structural health and triggers response protocols according to the evaluation level. The implementation of this system enables continuous monitoring and condition assessment of the bridge structure, ensuring safe and reliable operation.

Keywords: Xupu Bridge; health monitoring; arrangement of monitoring points; data collection; health evaluation

0 引言

桥梁健康监测系统是一种以桥梁结构为平台载体,借助现代信息技术,将结构监测、超限预警、数据分析处理,以及桥梁运营、养护管理等功能进行整合、优化的综合监测体系^[1]。该系统能够对大桥的结构响应数据进行实时采集,为大桥的养护管理工作提供科学依据,使大桥管理工作的整体效能得到明显提升。近 10 余年来,桥梁健康监测领域日益受到各方关注并取得了长足发展,世界多国已在众多已建及在建的大跨径桥梁中开展了相关实践探索^[2]。在上海,大多数特大型桥梁已陆续完成桥梁健康监测系统的安装,如上海长江大桥、闵浦大桥在

建成时就安装了健康监测系统,南浦大桥、杨浦大桥等也在近年完成安装。这些桥梁的监测系统为其安全运维发挥了重要作用。

1 徐浦大桥概况

徐浦大桥位于上海市徐汇区龙华街道和浦东新区三林镇附近的江面上,是上海市区外环线跨越黄浦江的特大型斜拉桥,1997 年建成通车。徐浦大桥为上海 S20 外环高速公路的组成部分,桥梁西起龙吴路立交,东至济阳跨线立交,是直接沟通沪宁、沪杭高速公路进入上海过江的交通枢纽。徐浦大桥主梁采用大跨径混凝土梁与钢-混凝土叠合梁混合结构,是世界上第一座采用该种结构形式的斜拉桥,曾获得全国优秀工程设计金质奖,其建成标志着我国桥梁建设达到世界先进水平。

徐浦大桥主桥全长 1 074 m,跨径布置为 40 m(过

收稿日期: 2025-05-21

作者简介: 王祺明(1980—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

渡孔)+40 m+3×39 m+45 m+590 m(中跨)+45 m+3×39 m+40 m+40 m(过渡孔),桥面宽度为35.95 m,过渡孔总宽为33.95 m。主塔高221 m,全桥共有240根斜拉索,大桥车道布置为双向8车道。

2 必要性和功能分析

2.1 实时掌握结构安全状态

在结构关键部位布设传感器,利用在线采集、传输、处理技术,随时掌握桥梁在正常运行状态下的结构内力、变形情况和损伤情况,并根据结构健康指标的长期变化规律进行分析和预测,及早发现桥梁结构面临的危险状况,为维护和修复桥梁结构提供科学依据,做到真正意义上的预养护^[3]。

2.2 及时预警与辅助快速决策

在大桥运营过程中,时刻都有可能因外界环境、结构负载、交通行为等因素引发突发问题,如地震、火灾、爆炸、大风、危险品泄漏等突发性事件。当事件发生时,利用安全指标的在线报警功能,及时向各相关部门发送事件信息和应急预案建议,并迅速协调养护部门进行善后维修工作,避免或减少生命财产损失^[4]。

2.3 桥梁养护高效管理

通过健康监测系统,可将监测数据与结构安全相关指标的检测数据进行对比分析,结合养护技术相关标准,规范大桥具体养护作业(如各类定期检测项目的检测方法、频率及数据保存要求等),强化对养护工作的科学指导作用,为养护工作的规范化和精细化提供强力的技术支撑,显著改进养护管理工作的效率和质量^[5]。

2.4 智能化人工巡检和养护

通过对传感器监测数据的处理和分析,可以全面了解大桥各构件的结构安全状态和发展趋势,不仅可以给人工巡检和养护工作提供科学的依据,还可以辅助管理和养护人员合理制订工作计划,将有限的资源最优化利用。

2.5 设计验证及科研需求

徐浦大桥作为特大跨斜拉桥,是我国的标志性桥梁之一,其在结构形式和细节设计方面有多个创新点。通过对大桥运行期间各种荷载作用下关键结构位移、索力、结构振动等指标的响应跟踪,可以较好地设计进行验证;同时,累积的客观监测数据可以作为科学研究的依据,指导类似桥梁的建设。

2.6 满足政策和规范标准的要求

2021年初,交通运输部印发《公路长大桥梁结构健康监测建设实施方案》(交办公路[2021]21号),其中附录《全国公路系统特大桥梁一览表》。这一方案的出台,拉开了我国公路桥梁监测体系现代化升级的序幕。随后,交通运输部在完善行业规范方面,制定并发布了《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022),对公路桥梁结构监测技术的各方面提出了明确要求。同时,交通部对建设特大桥梁健康监控系统的时间节点也提出了明确要求,计划到2023年底,推动所有超大型桥梁基本建成数据平台、监控平台,建成与国家统一标准相适应的体系。

3 系统建设方案

3.1 系统建设原则

系统建设以结构分析计算为基础,集通信、网络、传感器、软件开发等高新技术于一体^[6]。为满足系统的使用功能和目标要求,系统建设需遵循以下原则。

(1)设计、采购、实施、维护、管理,各阶段严抓质量。

(2)以简洁、实用、可靠、经济为指导思想^[7]。

(3)以桥梁的结构特点和结构计算结果为依据,结合桥梁养护规范、结构安全管理、养护管理需求,以及类似桥梁的建设经验,确定监测内容、测点布置、监测方法^[8]。

(4)以结构响应监测为主,以环境荷载监测为辅,对大桥进行全方面监测,以最经济的布点方案完成监测功能^[9]。

(5)结构安全运维管理系统与综合监控系统、养护管理系统融合,实时掌握桥梁结构的健康状况,对突发情况和损伤情况做到及时发现并尽早处理,使桥梁的运营养护工作智能化、高效化^[10]。

(6)应具有稳定性、可扩展性和兼容性,考虑与大桥相关的各类系统建立互联互通机制^[11],并考虑综合利用上海市已有大桥运维管理系统的数据库。

3.2 监测内容和测点布置

为确定徐浦大桥监测系统实时监测布点,综合考虑多方面因素,如大桥的原设计图、近期检测报告、桥梁结构有限元计算,以及同类桥梁方案等。

测点布置位置和截面编号如图1和图2所示。

传感器数量、采样频率、布点说明如下。

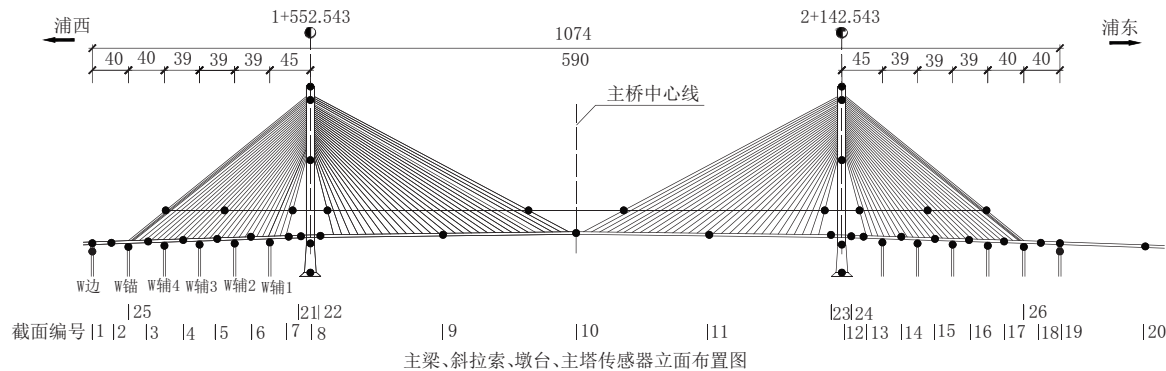


图 1 徐浦大桥全桥测点布置和截面编号示意图(单位:m)

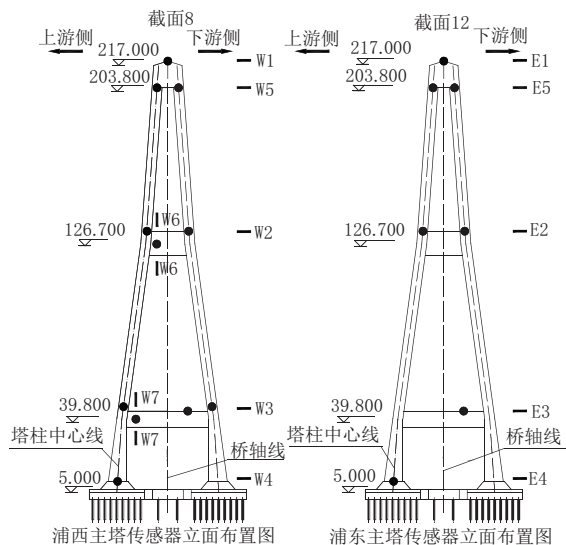


图 2 徐浦大桥主塔测点布置和截面编号示意图(单位:m)

(1)动态称重仪。监测车辆轴重和总重,数量为1套,覆盖全部8车道,布置在截面编号20处。采样频率为车辆通过时触发。

(2)风速风向仪。监测环境风荷载,共2个,设置在主跨跨中处桥面上游侧、浦西侧主塔塔顶,截面编号为10、W1。采样频率为1 Hz。

(3)大气温湿度计。监测环境温度和湿度,共11个,主跨跨中处桥面上游侧设置1个,主跨跨中处钢箱梁内部上、下游各设置1个,2个主塔每根塔柱内的拉索锚固区各2个,截面编号为10、W5、W2、E5、E2。采样频率为0.017 Hz。

(4)结构应变计。监测钢结构和混凝土结构应力,共84个。其中,钢结构应变计根据全桥有限元计算分析结果,在主跨跨中断面、塔梁结合部混合梁交接处叠合梁侧断面、混凝土箱梁侧断面(混合梁交接处指叠合梁与混凝土梁交接处),共5个断面,每个断面设置12个,共计60个,截面编号为10、21、22、23、24。混凝土应变计在浦西侧主塔的2根塔柱上各选取2个断面,结合主塔2根横梁的6个断面,各断面均设置3个测点,累计安装24个,截面编号为

W2、W3、W6、W7。采样频率为20 Hz。

(5)温度传感器。监测结构温度,共60个。主梁上的传感器设置在主跨跨中、浦西侧混合梁交接处叠合梁侧和混凝土梁侧的断面处,共3个截面,每个截面布置12个,共计36个,截面编号为21、22、10。主塔上的传感器设置在浦西主塔应变监测断面处,各断面设置4台,共计24台,截面编号为W2、W3、W6、W7。采样频率为0.017 Hz。

(6)索力计。监测斜拉索索力和振动加速度,共20个。选取最长索、最短索,以及边跨P3辅助墩处的16#索,实施同步索力监测。此外,对其中最长的8根拉索采用1:1实施测点冗余设计,共设置8个冗余监测点位。采样频率为50 Hz。

(7)单向加速度计。监测结构动力特性,共25个。其中,主梁竖向加速度计18个,在每个边跨跨中位置各布设1个,于主跨4分点截面上、下游分别布设1个,截面编号为2~7、9~11、13~18;主梁横向加速度测定仪3个,设置在主跨4分点截面上游侧箱梁,截面编号为9~11;主塔上设置4台加速度计,浦西主塔与浦东主塔塔顶各布置横向加速计1台、纵向加速计1台,截面编号为W1、E1。采样频率为50 Hz。

(8)强震仪。监测地震强度,共2个。在2个主塔的承台上各设置1个测点,截面编号为W4、E4。采样频率为50 Hz。

(9)GNSS测站。监测塔顶和主梁三向位移和挠度,共9个。在桥面跨中和4分跨位置的上、下游侧各布置1个测站,截面编号为9~11;2个主塔的塔顶各布置1个测站,截面编号为W1、E1;在合适的地方设置1个基站。采样频率为10 Hz。

(10)纵向位移计。监测纵向位移,共8个。主塔支座处设置4个,截面编号为W3、E3;边墩大位移伸缩缝处布置4个纵向位移计。采用1:1实施测点冗余设计,共设置4个冗余监测点位,截面编号为1、

19. 采样频率为 1 Hz。

(11)倾角仪。监测梁端转角,共 8 个。于两侧梁端的上、下游方向,分别设置 1 个水平转角测点和 1 个竖向转角测点,截面编号为 25、26。采样频率为 1 Hz。

(12)裂缝计。裂缝宽度监测,共 4 个。在叠合梁与混凝土梁交接处等混凝土受力敏感部位,选取 4 处有代表性的裂缝进行安装并实施监测,截面编号为 22、23。采样频率为 0.017 Hz。

(13)机器视觉系统。监测墩台沉降,共 12 个。设置在主塔及各辅助墩墩顶。采样频率为 1 Hz。

(14)摄像机。监控桥下通航状况,共 3 个。设置在 2 个主塔处及主跨跨中梁底处,实时监测,截面编号为 10、W3、E3。

全桥共 249 个测点,另有 12 个冗余测点。部分监测设备现场图片如图 3 至图 5 所示。



图 3 GNSS 测站实景图



图 4 光纤光栅位移传感器安装图



图 5 振动式索力传感器安装照片

3.3 数据采集

外场设置 2 个自动采集外场传感器资料的采集工作站。2 个外场工作站设立在 2 个主塔下横梁处,浦东、浦西侧各 1 个。根据桥梁感知方法、传感器数量和分布确定数据采集方法,包括数据采集硬件、软件及数据采集制式,保障获得高精度、高质量的数据。

这套数据采集系统由 2 个工作站和分布在大桥上的综合信息网络组成,采用集中与分散相结合的方式 进行数据采集。采集设备和光纤信号传输网络采用当下最先进的设备,以保障系统的安全和稳定。部分监测设备数据图如图 6 至图 8。

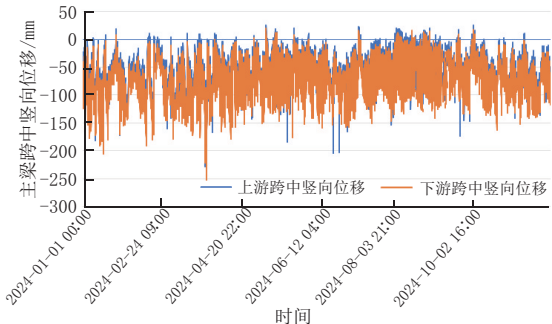


图 6 2024 年度中跨跨中竖向位移

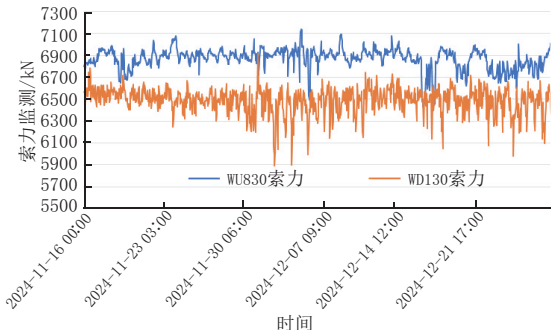


图 7 2024 年 11—12 月索力监测

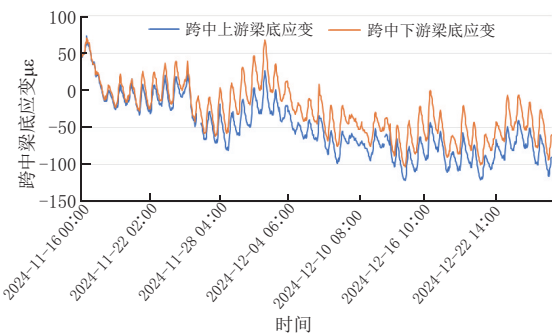


图 8 2024 年 11—12 月中跨跨中箱梁底板应力应变

3.4 数据传输

整个系统由 2 台以太网交换机和 1 台健康监测中心交换机组成双纤自愈环网,全网以 TCP/IP 协议集为基础,运行动态路由协议,保障传输网络的安全和稳定。

系统中所有的数据采集工作站连接现场的以太网交换机,再接入整个数据采集和传输网络。工作站与服务器都设置 2 条以上通路,保证系统在通路损坏 1 条时仍能正常工作。

通信光缆将由监控中心沿引桥敷设至主桥的外场工作站,形成光纤环网,并将现场监测数据传回监控中心的服务器系统。

3.5 超限阈值与报警

超限阈值依据规范要求划分成 3 级,当监测数据超出任意一级的限值时,系统将自动触发报警系统。这是桥梁结构健康监测系统的重要功能之一^[12]。对实测的关键位移、索力、风速、加速度和应变数据进行分析处理,得到相应的预警指标,通过指标监测值与设定的超限报警阈值进行比对,从而实现在线预警功能^[13]。

3.6 预警体系

徐浦大桥健康监测系统预警指标分为环境、作用、结构响应和结构变化 4 大类,按照规范的规定,将具体监测内容划分为百多个监测指标。根据各指标的阈值,将指标监测数值划分为绿、黄、橙、红 4 个区间,分别代表 I 基本完好(绿色)、II 轻微异常(黄色警报)、III 中等异常(橙色警报)、IV 严重异常(红色警报)4 级。

3.7 数据应用情况

徐浦大桥健康监测系统竣工后即投入运营。由专业单位对监测数据进行专项分析,每年度出具数据分析应用报告,对大桥健康度进行评估。目前,徐浦大桥平台运行稳定、可靠,各项健康监测指标均处在设计合理范围内,反映出当前大桥结构状况良好,处于较好的工作状态。

4 结构健康度评估

桥梁结构健康度等级划分为 4 级,以下为各级健康度评定依据,健康度等级对应结构整体情况。

I 级,基本完好。根据主梁位移、塔顶位移、支座位移、振动响应等监测数据,以及塔顶永久偏位、主梁持续下挠、桥墩沉降、索力基准值变化、剔除环境影响的桥梁主要频率变化等的分析结果,超限等级全部为一级或无超限。

II 级,轻微异常。根据主梁位移、塔顶位移、支座位移、振动响应等监测数据,以及主梁持续下挠、桥墩沉降、索力基准值变化、剔除环境影响的桥梁主要频率变化等的分析结果,超限等级仅有 1 项为二

级、无三级。

III 级,中等异常。根据主梁位移、塔顶位移、支座位移、振动响应等监测数据,以及塔顶永久偏位、主梁持续下挠、桥墩沉降、索力基准值变化、剔除环境影响的桥梁主要频率变化等的分析结果,超限等级出现多项(2 项及以上)二级或 1 项三级;或当塔顶位移出现(1 项及以上)二级,或多项构件健康度处于中等异常。

IV 级,严重异常。根据主梁位移、塔顶位移、支座位移、振动响应等监测数据,以及塔顶永久偏位、主梁持续下挠、桥墩沉降、索力基准值变化、剔除环境影响的桥梁主要频率变化等的分析结果,超限等级出现多项三级,或多项构件健康度处于严重异常。

徐浦大桥监测系统通过监测数据实时分析,并与超限阈值比较,进行桥梁结构健康度评估,健康度评估结果将按要求发送给省级平台。当构件健康度或结构整体健康度为 III 级(中等异常)或 IV 级(严重异常)时,将提醒相关部门进行专家研判。

5 结 语

桥梁结构安全是保障道路交通设施发挥其功能作用的前提^[14],桥梁出现安全事故往往会造成巨大的生命财产损失和严重的社会影响^[15]。桥梁结构健康监测系统是融合多学科、多专业的集成化综合工程,对大桥建设与安全运营具有显著的促进作用^[16]。当前,从国家到地方各级政府,均高度重视城市基础设施安全,陆续出台一系列实施意见与规范标准^[17]。徐浦大桥作为上海城市的标志性建筑,其健康监测系统的实施与应用,将为大桥的运营维护提供有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 同济大学,上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市城市建设设计研究院(集团)有限公司,等.大型复杂桥梁结构健康监测及在线评估关键技术研究科研项目结题验收报告[Z].上海:同济大学,2009.
- [2] 纪为详,郭翠翠,李星新,等.贵州坝陵河大桥健康监测系统设计[J].世界桥梁,2012,40(3):15-19.
- [3] 翁方文,朱浩,郑建新.大跨斜拉桥全寿命安全监测系统设计[J].天津:中国港湾建设,2017,37(3):48-52.
- [4] 陈艾荣,潘玥,王达磊,等.大数据时代的桥梁维护与安全[J].上海公路,2014(1):17-23.
- [5] 杨军.大数据分析技术在桥梁健康监测中的应用[J].现代交通技术,2016(3):30-32.
- [6] 陈兴文,冉哲.公路桥梁结构健康监测数据分析综述[J].中国信息界,2024(9):250-252.

(下转第 200 页)